第 40 卷 第 2 期
2023 年 4 月

应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 40 No. 2
Apr. 2023

文章编号:1000-4939(2023)02-0340-10

黄土地基微型桩基础上拔及下压承载性能研究

夏峻[1],白汗章[1],王佳佳[2],付红安[1],王学平[1],孙清[2]

(1. 宁夏宁电电力设计有限公司,750001 银川;2. 西安交通大学,710054 西安)

摘 要:在软土地基中,微型桩常用作输电线路杆塔基础,而在黄土地区的应用相对较少。为了研究黄土地基微型桩基础的上拔及下压承载性能,本研究基于微型桩原位静载荷试验,分析了桩长、桩径及黄土湿陷性等不同参数对微型桩承载性能的影响;同时创建了三维桩土相互作用的有限元模型,对比其数值模拟结果与试验数据,验证了有限元模型的正确性,进一步分析了桩长、桩径及桩身弹性模量对其抗拔及抗压承载性能的影响。结果表明:相比其抗拔承载力而言,黄土湿陷性对微型桩抗压承载力的影响更大,且浸水后微型桩基础的破坏曲线斜率更大。黄土地基微型桩的竖向承载特性主要取决于桩侧摩阻力,桩长对抗拔、抗压极限承载力影响较桩径显著。上述研究对微型桩基础在黄土地区的应用具有较好的参考价值。

关键词:微型桩;黄土湿陷性;静载试验;数值模拟;竖向承载特性

中图分类号:TU473 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.02.012

Uplift and press bearing capacity of micro-pile foundation for transmission line on loess ground

XIA Jun[1], BAI Hanzhang[1], WANG Jiajia[2], FU Hongan[1], WANG Xueping[1], SUN Qing[2]

(1. Ningxia Ningdian Power Design Institute CO., CTD., 750001 Yinchuan, China;
2. Xi'an Jiaotong University, 710054 Xi'an, China)

Abstract: The micro-piles have been widely used in transmission line tower foundation on soft soil foundation, but it is relatively less used on loess foundation. In order to study the uplift and press bearing capacity of micro-pile foundation on loess foundation, the effects of pile length, pile diameter and loess collapsibility on the bearing capacity of micropiles are analyzed based on the field static load test. To overcome the limitation of the field test, the three-dimensional finite element models of pile-soil interaction are established to compare the results of numerical analysis and experimental results. The finite element model is verified, and then used to analyze the effects of different pile length and pile diameter pile elastic modulus on the uplift and the compressive load performance. The results could be drawn from this study show that the impact of loess collapsibility on the compressive bearing capacity of micro-pile is greater than that of uplift bearing capacity, and the failure curve of the micro-pile foundation after immersion in water presents a

收稿日期:2022-08-09 **修回日期**:2022-10-11
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51978570)
通信作者:王佳佳。E-mail:wjj970226@stu.xjtu.edu.cn
引用格式:夏峻,白汗章,王佳佳,等. 黄土地基微型桩基础上拔及下压承载性能研究[J]. 应用力学学报,2023,40(2):340-349.
XIA Jun, BAI Hanzhang, WANG Jiajia, et al. Uplift and press bearing capacity of micro-pile foundation for transmission line on loess ground [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(2):340-349.

more obvious steep drop. The vertical bearing capacity of micro-pile on loess foundation is mainly determined by pile lateral friction resistance. The influence of pile length on ultimate bearing capacity is more significant than that of pile diameter. The above research has good reference value for the application of micro-pile foundation on loess ground.

Key words: micro-pile; loess collapsibility; static test; numerical simulation; vertical bearing characteristics

目前，在“三华”同步电网的趋势下，输电线路必然覆盖广阔的黄土地区，因此，黄土地区输电线路基础的选型和优化是线路基础设计的重要内容。输电线路基础常年受到上部塔线结构、风及覆冰脱冰等外荷载，且荷载的大小及方向会时刻受到气象条件影响，杆塔基础的承载性能研究尤为重要。现阶段开挖类或掏挖类基础在黄土地区较为常用。当荷载较大时，开挖类基础往往土方量巨大，施工困难，且混凝土及钢筋材料用量较大；而掏挖类基础往往掏挖土方量较大，且掏挖深度也较大，施工机具笨重，施工难度大。

微型桩基础的桩径小于 400 mm，长细比大于 30，由树根桩演化而来。微型桩构件小，基础施工对黄土扰动小，成孔器械轻便，能够适应山地地质条件及机械化施工难题；能充分利用黄土这一原状土的承载特性，基础具有较高的承载力；目前广泛应用于基础托换支护、基坑开挖、古建筑物加固等领域[1-6]。近年来中国电力科学研究院先后在上海、浙江、安徽和佛山等典型软土地基进行了现场真型试验，并在 500 kV 宁海—苍岩双回线路、500 kV 安庆—庐桐变电站线路中进行试点应用，取得了良好的经济效益和社会效益[7]。微型桩开始被广泛应用到软土地基输电线路杆塔基础，而对于黄土地基输电线路杆塔基础中微型桩的应用相对较少，黄土地基一方面具有良好的结构性，另一方面普遍存在垂直方向节理裂隙，而微型桩的微创式施工工艺可以平衡这 2 方面的矛盾，兼具施工的易性和安全性。因此，黄土地基微型桩基础承载性能的研究具有重要意义。

自 20 世纪 50 年代以来，国内外学者通过现场试验及有限元分析对微型桩的承载性能及变形特性进行了大量研究。SHIN 等[8]通过现场试验对微型桩承载力的影响因素进行了系统分析，得出其承载性能受桩横截面面积、桩土相互作用系数等的影响规律。龚建[9]在软土地基中进行了微型单桩及群桩原位试验，得出软土地基杆塔微型桩基础设计的计算方法。吕凡任等[10]通过试验研究发现软土地基微型桩的极限承载力可取 20 mm 沉降量对应的荷载，并对其施工关键技术进行了总结提炼。苏荣臻等[11]在软土地基进行现场试验，提出了单桩抗拔极限承载力计算经验公式，并指出二次注浆可提高其极限承载力。PATRA 等[12]的试验研究表明随着桩轴压力的增加，桩侧阻力沿桩长随之减小。屈勇[13]通过对软土地基微型桩基础数值模拟，提出微型桩具有临界桩长和桩身最佳倾角。张奎等[14]基于西安地区黄土进行了微型桩水平加载的模型试验，研究发现，微桩水平承载力受土体饱和度影响较大。并通过回归分析发现二次非线性回归函数能更好的拟合试验结果。从上述研究可以看出，对于微型桩基础承载性能的研究主要集中在软土地区，对于黄土地基微型桩的承载性能及变形特性研究相对较少，而黄土具有的自立性和层理裂隙等特性又与软土不同，致使微型桩在黄土地区的广泛应用缺乏系统的理论支撑。

为加强微型桩基础在黄土地区的理论研究支撑，使输电线路杆塔微型桩基础更好地在黄土地区推广应用。本研究对黄土地基微型桩进行现场试验，并建立了微型桩基础 - 黄土相互作用的三维有限元模型，分析其桩长、桩径以及桩身弹性模量对其竖向承载性能的影响。

1　微型桩极限承载力试验研究

1.1　试验概况

试验位于陕西省兴平市，试验土层主要为第四系中更新统风积黄土，褐黄色，可塑，黏粒含量大，质地均匀，富大孔隙，地层结构简单。通过现场土工试验测得黄土地质参数如表 1 所示。

表 1　黄土地质参数

Tab. 1　Characteristic parameters of loess site

土层	ρ/(kN·m^{-3})	ω/%	c/kPa	φ/(°)	δ_s
黄土(0～9 m)	16.1	22.9	12.9	17.2	0.047
古土壤(9～16 m)	17.1	20.7	16.0	18.0	0.035

试验场地共设计 13 组微型桩单桩试验，试桩桩径均为 300 mm，桩长分别为 6、8、10 m，具体工况如表 2 所示。

表 2　试验工况

Tab. 2　Test classification

桩号	桩长/m	桩径/mm	试验工况
D1	6	300	水平 + 抗拔
D2	8	300	水平 + 抗拔
D3	10	300	水平 + 抗拔
D4	6	300	抗拔
D5	8	300	抗拔
D6	10	300	抗拔
D7	6	300	下压
D8	8	300	下压
D9	10	300	下压
D10	8	300	浸水上拔
D11	8	300	浸水上拔
D12	8	300	浸水下压
D13	8	300	浸水下压

注：试桩为钻孔灌注桩，桩身采用 C25 混凝土，试桩主筋采用 8 Φ16。

试桩钻孔在地下水位以上进行。试桩灌浆时，先将直径为 200 mm 的钢筋笼置于预钻孔中，其次将注浆套管伸入孔中心来完成灌浆。经检测所有试桩的桩身质量均满足要求。

1.2　浸水试验

为了研究黄土湿陷性对微型桩承载性能的影响，在试验场地进行了浸水试验。浸水坑尺寸为 1.4 m × 1.4 m × 0.7 m。为保证桩周土体的湿润性，浸水坑采用塑料薄膜覆盖。首先，将 4 个直径为 100 mm的预钻孔对称置于坑体四周，然后，再将直径 20 mm 的聚氯乙烯管置于孔洞中心。管身均设置了若干直径为 5 mm 的渗水孔，孔间距为 200 mm。孔洞与管壁之间的空隙用细砂填充。在进行浸水预湿时，坑内水位始终位于管口上方约 150 mm 处。

图 1 为浸水时间与浸水方量、浸水深度的关系曲线。由图 1 可知，当浸水时间在 0 ~ 95 h 时，浸水方量与浸水时间为线性关系，浸水速率约 0.47 m^3/h；当浸水时间超过 95 h 后，浸水方量与浸水时间的关系曲线斜率显著减小，表明该时段黄土浸湿充分。与此同时，当浸水时间在 0 ~ 5.2 h 时，土体浸湿深度从 0 cm 下降至 123.9 cm，下移速度约为 24 cm/h；当浸水时间在 5.2 ~ 95 h 时，浸水深度与时间为线性分布，土体浸湿深度约以 2.03 cm/h 匀速下移；当浸水时间为 95 h 时，土体浸湿的深度为 306.3 cm。GIBBS 等[15]提出 20% 以上含水率的土体是高含水率土，在一定荷载作用下能完全固结；当含水率为 35% 左右时，土体饱和。因此，该浸水后的土体为饱和或接近饱和黄土。

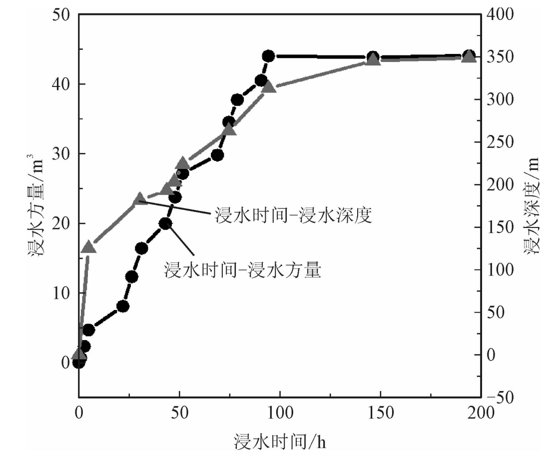


图 1　浸水时间与浸水方量、浸水深度关系曲线

Fig. 1　Curve of immersion time and immersion volume, immersion time and immersion depth

1.3　反力装置及加载方案

根据《建筑基桩检测技术规范 JGJ106 – 2014》，上拔试验采用由反力桩及反力梁组成的反力装置，利用千斤顶和锚固在试桩中的拉杆对试桩进行加载控制。单桩上拔试验反力装置如图 2 所示。

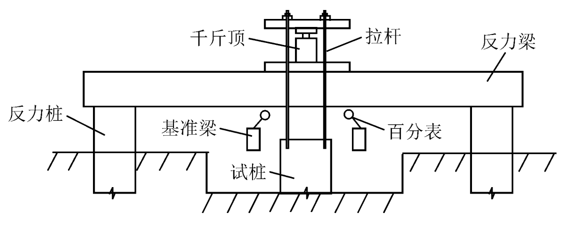


图 2　单桩上拔试验反力装置

Fig. 2　The reaction force device in the field test of single pile uplift

下压试验采用堆载反力装置，钢梁与千斤顶之间依靠放在桩头上的千斤顶将平台逐步顶起，从而将力施加到桩身。单桩下压试验装置如图 3 所示。

水平加上拔试验利用竖向及水平向布置千斤顶对试桩进行荷载的施加，具体试验装置见图 4。结合输电线路杆塔基础受力特性，施加的水平荷载为上拔荷载的 15%。

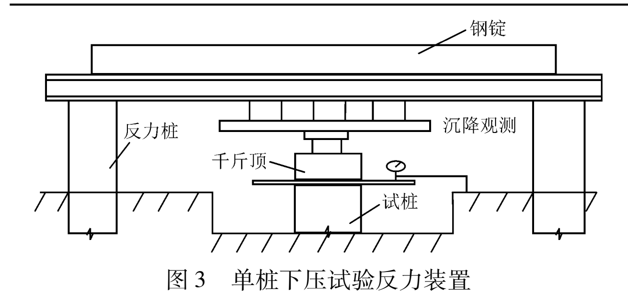


图 3　单桩下压试验反力装置

Fig. 3　The reaction force device in the field test of single pile compression

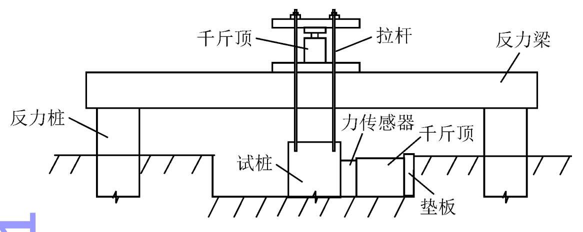
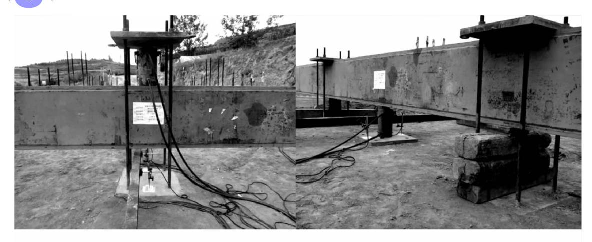


图 4　单桩水平加上拔试验反力装置

Fig. 4　Single pile horizontal and pull up test reaction device

依据《桩基检测技术规范 JGJ106-2014》,采用缓慢维持荷载法进行分级等量加载;将试桩极限承载力预测值的 10% 作为每级荷载施加值,其中,第一级荷载施加值设定为每级荷载值的 2 倍。当桩顶竖向位移变化速率不超过 0.1 mm/h 时,达到了加载稳定标准,提取相对应的荷载、应变和位移值,然后再施加下一级荷载。试验过程中出现下列情况之一时,可视为试桩达到极限承载状态,即可结束加载:①位移变化控制,某一级荷载下的桩顶竖向位移值大于上一级荷载下桩顶竖向位移值的 5 倍;②总位移控制,桩顶竖向位移累积量大于 100 mm;③钢筋应力达到钢筋屈服强度。单桩现场试验如图 5 所示。



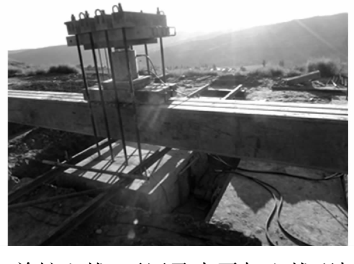


图 5　单桩上拔、下压及水平加上拔现场试验

Fig. 5　Field tests of single pile up-drawing, down-pressing, horizontal and up-drawing

1.4　试验结果分析

图 6 为微型单桩在上拔荷载作用下的荷载-位移(Q-S)曲线。从图 6 可以看出,8 根试桩破坏曲线较为接近,大致分为:弹性阶段、弹塑性过渡段及极限破坏 3 个阶段。曲线整体呈现"陡降型",这是因为桩土界面出现相对错动较大,桩土界面发生剪切破坏,导致界面失效。极限抗拔承载力取其发生明显陡降的起始点所对应的荷载值[16]。单桩极限承载力及对应位移如表 3 所示。

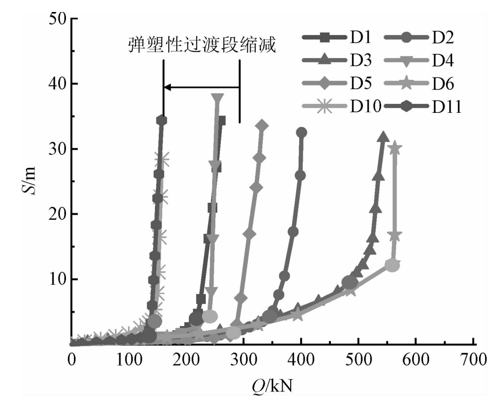


图 6　单桩上拔 Q-S 曲线

Fig. 6　Q-S curve of single pile uplift

表 3　单桩极限承载力汇总

Tab. 3　Summary of ultimate bearing capacity of single pile

桩号	桩长 /m	桩径 /mm	试验工况	极限承载力/ kN	对应位移 /mm
D1	6	300	水平 + 抗拔	216	3.20
D2	8	300	水平 + 抗拔	350	4.16
D3	10	300	水平 + 抗拔	490	9.88
D4	6	300	抗拔	240	4.51
D5	8	300	抗拔	300	2.12
D6	10	300	抗拔	560	12.44
D7	6	300	下压	330	6.14
D8	8	300	下压	375	4.06
D9	10	300	下压	600	7.15
D10	8	300	浸水上拔	150	3.43
D11	8	300	浸水上拔	140	1.93
D12	8	300	浸水下压	120	1.04
D13	8	300	浸水下压	120	4.38

从试件 D1、D2、D3 试验结果可以看出,在水平加抗拔复合工况下,桩径不变,桩长从 6 m 增加到 10 m,其极限抗拔承载力从 216 kN 增至 490 kN,增

幅127%,对应位移由3.20 mm增加至9.88 mm,增幅209%;同样试件D4、D5、D6试验结果表明,在单一抗拔荷载作用下,桩径不变,桩长从6 m增加到10 m,其极限抗拔承载力从240 kN增至560 kN,增幅133%,对应位移由4.51 mm增加至12.44 mm,增幅176%;对比试件D1与D4,桩长、桩径不变,由水平加上拔荷载变为上拔荷载作用时,其极限抗拔承载力增幅11%,位移增幅41%;从试件D4和D10对比来看,浸水后试桩"陡降型"破坏曲线更为明显,弹塑性曲线过渡段缩减,陡降段起始点明显前移,是因为黄土在浸水过程中,其良好的结构结构性遭到破坏、刚度劣化、塑性指标也下降,发生了能量的转换和耗散[17],其极限抗拔承载力由350 kN缩减至150 kN,缩减为原来的42.9%,而浸水对位移影响相对较小。

图7、图8分别为微型桩D4在不同等级的上拔力作用下,桩身轴力、桩侧摩阻力沿桩深的分布曲线。由图7可知,当桩受上拔力时,桩身轴力值沿桩深逐渐减小,到桩端下部轴力值几乎接近于0。桩身上部轴力值较大,下部轴力值较小。主要是由于在上拔力作用下,桩抵抗上拔力主要依靠桩侧摩阻力。由图8可知,在上拔荷载作用下,桩侧摩阻力随桩深增加先增大后减小。桩身上部距桩顶1.5 m左右的摩阻力率先发挥,且达到极限值。随着上拔力增加,桩身上部的侧摩阻力完全发挥后跌落为残余强度,出现侧阻软化现象,桩身下部的侧摩阻力逐渐增大,最终达到极限状态。

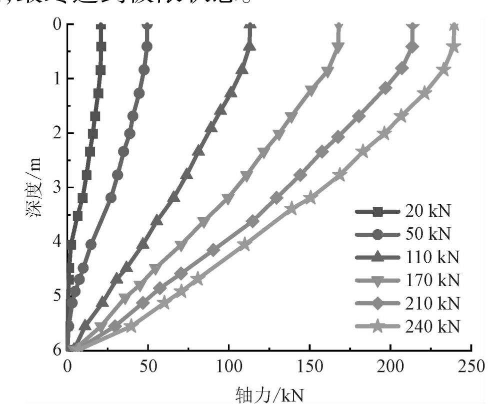


图7 不同上拔荷载下轴力分布曲线(D4)

Fig. 7 Axial force distribution curve under different uplift loads(D4)

图9为微型单桩在下压荷载作用下的 Q-S 曲线。从图9可以看出,5根试桩破坏曲线形态较为接近,曲线整体呈现"陡降型",对比试件D7、D8、D9可以看出,桩长从6 m增加到10 m,其极限抗压承载力从330 kN增至600 kN,增幅82%,对应位移由6.14 mm增加至7.15 mm,增幅16%;而D8和D12对比来看,浸水后弹塑性曲线过渡段也出现缩减或缺失现象,其极限抗压承载力由375 kN缩减至120 kN,缩减为原来的33.3%,而浸水对位移影响相对较小。

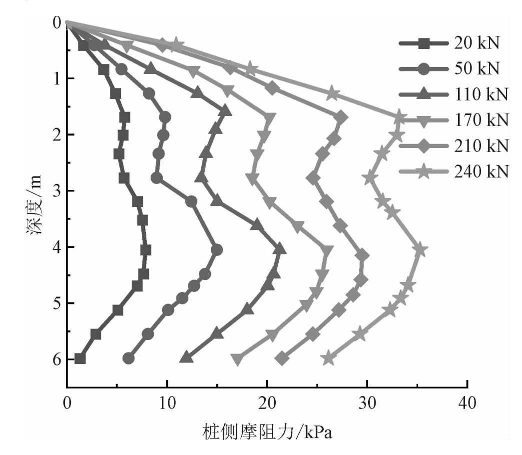


图8 不同上拔荷载下桩侧摩阻力分布曲线(D4)

Fig. 8 Distribution curve of pile side friction resistance under different uplift loads (D4)

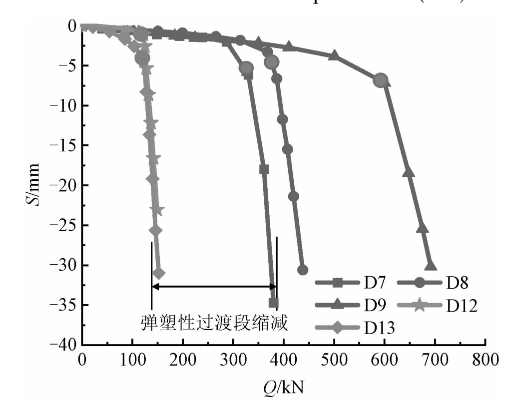


图9 单桩下压 Q-S 曲线

Fig. 9 Q-S curve of single pile under pressure

图10、图11分别为微型桩D4在不同等级的下压荷载作用下,桩身轴力、桩侧摩阻力沿桩深的分布曲线。由图10及图11可知,D4在下压力作用下的桩身轴力分布曲线与在上拔力下的分布曲线大致相同,而桩侧摩阻力的分布稍有区别。在下压荷载作用下,桩侧摩阻力沿桩深先增大后减小,桩身上部的侧摩阻力首先发挥,与上拔荷载不同的是,桩身下部5.2 m左右的侧摩阻力突增,且随着荷载增加,突增更加明显,这是因为随着荷载增大,桩端土体会向远离桩端的方向运动,而桩周土体对桩端挤出土体产生约束作用,在桩土接触面面积一定的条件下,桩周土对桩挤压作用越大,桩侧摩阻力越大。

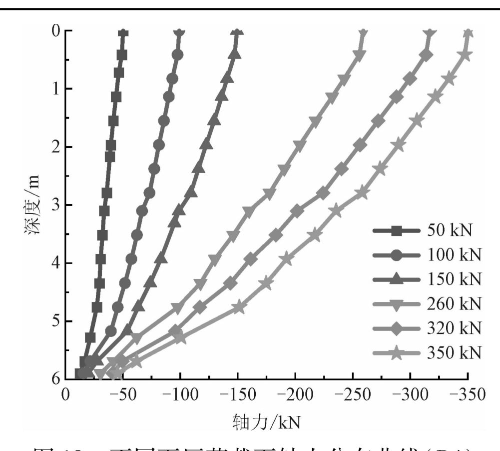


图 10　不同下压荷载下轴力分布曲线(D4)

Fig. 10　Axial force distribution curve under different press loads(D4)

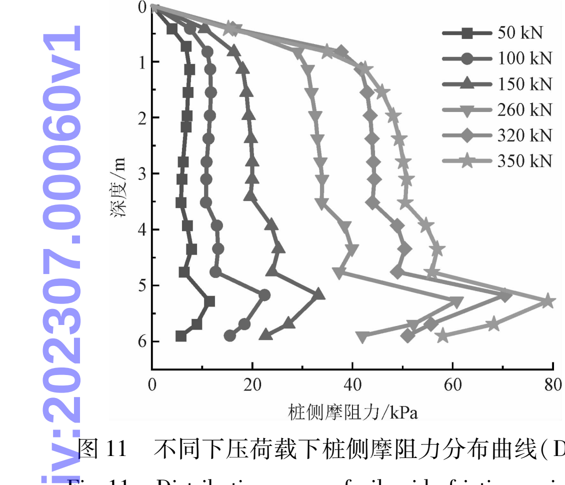


图 11　不同下压荷载下桩侧摩阻力分布曲线(D4)

Fig. 11　Distribution curve of pile side friction resistanc under different press loads(D4)

综合上述试验结果可以看出,未浸水微型桩基础桩长从 6 m 增加至 10 m,既可以大幅度提高其竖向承载力水平,也可以改善其达到失效状态下的变形;但增加桩长对于提高极限抗拔承载力的作用效果相对于提高极限抗压承载力更加显著;当水平荷载施加为上拔荷载的 15% 时,水平荷载对于其竖向承载力的影响相对较小。黄土浸水湿陷性对微型桩基础竖向承载力具有显著的影响,且浸水对于微型桩抗压承载力的折减影响相比于抗拔来说更大。根据轴力的衰减特点,微型桩主要是依靠桩侧摩阻力来承受上拔、下压荷载。

2　微型桩极限承载力数值模拟

试验结果分析表明,桩长对于其竖向承载性能的提高作用显著,为了进一步研究其他桩身参数对于其抗拔及抗压承载性能的影响,采用数值模拟方法对桩径、桩身弹性模量对其承载力的影响进行了进一步分析。

2.1　模型建立

利用有限元软件 ABAQUS 对微型桩的抗拔、抗压承载性能进行了数值模拟,模拟桩径初步定为 300 mm,桩长 6、8、10 m。采用线弹性模型模拟微型桩的力学行为,Mohr-Coulomb 本构模拟土的弹塑性行为,具体桩土模型参数见表 4。

表 4　桩土模型参数

Tab. 4　Pile-soil model parameters

项目	密度 $\rho/(\mathrm{kN\cdot m^{-3}})$	弹模 E/MPa	泊松比 μ	黏聚力 c/kPa	摩擦角 /(°)
土	16.6	20	0.35	14.5	18
桩	24	28 000	0.3	–	–

对于微型桩这种摩擦桩进行数值模拟时,面面离散法[18]能更好地模拟桩土之间的接触关系。本次建模中需要定义桩-土接触单元,首先将接触单元的切向定义为库仑剪切模型,即接触单元之间存在法向压力时,接触单元才可以传递切应力,即摩擦力,此接触单元的摩擦系数取 0.4;其次,接触单元的法向定义为硬接触,对于有相互作用的 2 个接触单元而言,仅在挤压状态才可以传递法向应力,保证接触单元不出现穿透;最后,主从面的选取也会影响计算结果的收敛性,根据接触面刚度定义接触对,将刚度较大的桩面设置为主控面,从面为土体接触面[19]。

模型采用三维 8 节点的缩减积分单元(C3D8R)进行网格划分,见图 12。



图 12　有限元模型网格划分(左为桩周土体,右为桩)

Fig. 12　Mesh division of finite element model (The soil is on the left and the pile is on the right)

为确保模拟精度,桩土接触部分网格划分较密。

基于现场试验边界条件,将桩周土体 4 个侧面的 X 和 Y 方向的位移赋值为零,底部 X、Y 和 Z 3 个方向的位移赋值为零。在桩顶中心耦合一点 RP-1(0,0,0)进行荷载施加,见图 13。

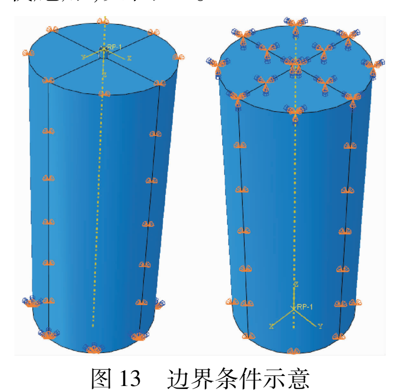
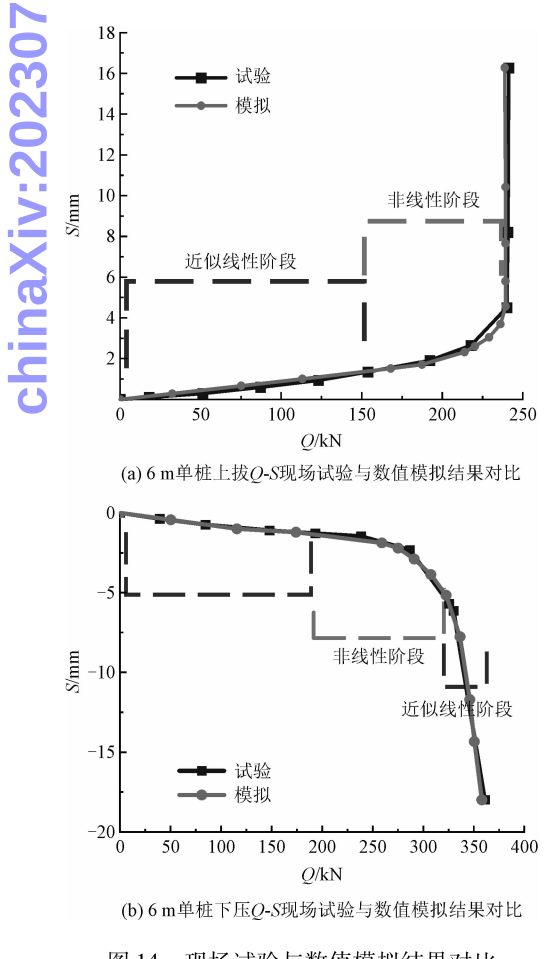


图 13 边界条件示意

Fig. 13 Schematic diagram of boundary conditions

2.2 数值与试验结果对比

图 14(a)、(b)分别是桩径 300 mm,桩长 6、8、10 m微型桩单桩受上拔、下压力时,现场试验与数值模拟的 Q-S 曲线对比。



(a) 6 m单桩上拔Q-S现场试验与数值模拟结果对比

(b) 6 m单桩下压Q-S现场试验与数值模拟结果对比

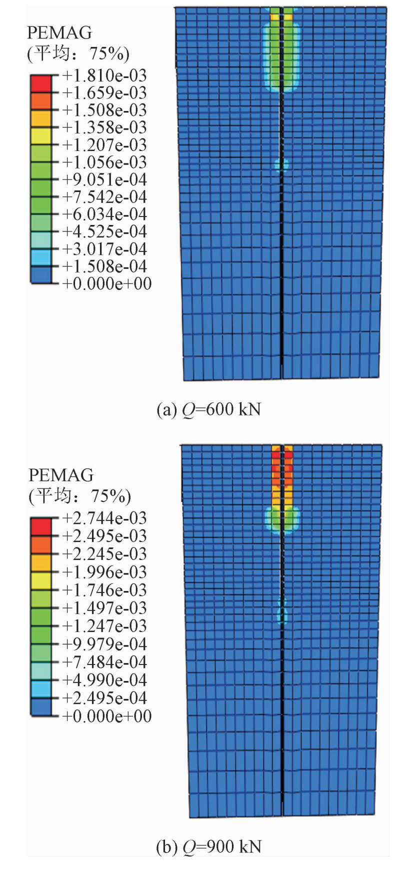
图 14 现场试验与数值模拟结果对比

Fig. 14 Comparison of field test and numerical simulation results

由图 14 可知,数值模拟结果与试验数据吻合良好,验证了有限元模型的正确性,可以采用该模型对微型桩进行桩身参数敏感性分析,研究其抗拔、抗压竖向承载特性。

2.3 微型桩破坏形态

ABAQUS 中用 PEMAG 表示土体的破坏形态,结合模拟结果分析,当上拔荷载为 600 kN 时,土体破坏呈现为沿桩土接触部分的柱状剪切面。随着上拔力增至 900 kN 时,桩土接触部分的塑性应变增大,但其破坏模式仍表现为沿接触面的柱状剪切破坏,其破坏云图如图 15 所示。



(a) Q=600 kN

(b) Q=900 kN

图 15 不同荷载下微型桩的破坏形态

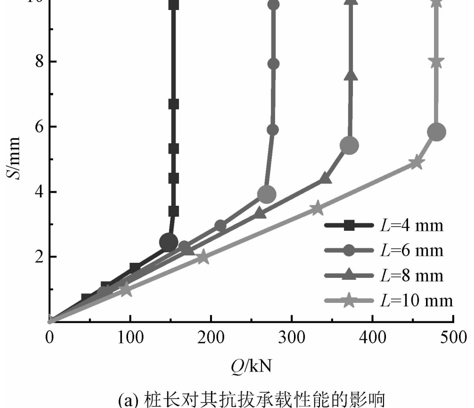
Fig. 15 Failure modes of micro-piles under different loads

3 桩身参数对抗拔承载力的影响

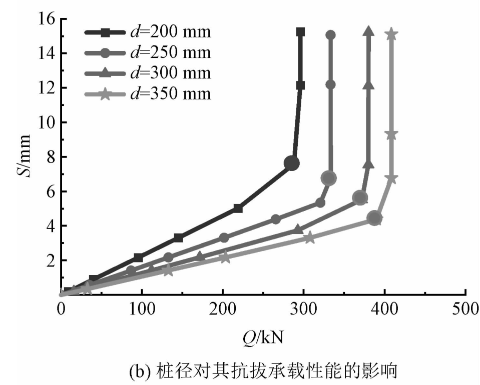
图 16(a)~(c)为桩长、桩径以及桩身弹性模量对微型桩抗拔极限承载力的影响。由图 16(a)~(c)可知,当上拔力较小时,桩土相对位移较小,为弹性变形阶段;当上拔力增加时,桩土产生相对位移,荷载以剪应力形式传递到土中,上部土体先达到极限侧摩阻力,处于塑性变形阶段,随后上部土体侧

阻降低，下部土体侧阻逐渐发挥最后达到极限状态。

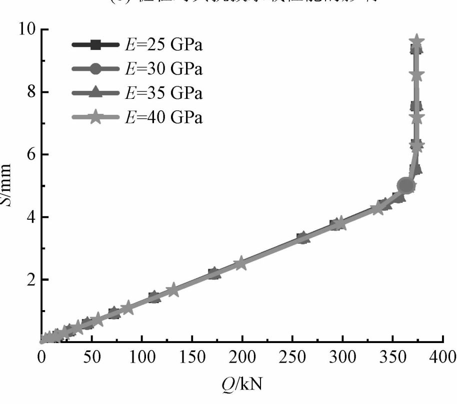




(a) 桩长对其抗拔承载性能的影响



(b) 桩径对其抗拔承载性能的影响



(c) 桩身弹性模量对其抗拔承载性能的影响

图 16　桩身参数对抗拔承载性能的影响

Fig. 16　The influence of pile parameters on the uplift bearing performance

随着桩长、桩径及桩身弹模数值增加，桩的极限抗拔承载力有不同程度的提高。桩长从 4 ~ 10 m，桩的极限抗拔承载力增加了 330.2 kN，增幅 222.4%；桩径从 200 ~ 350 mm，桩的极限抗拔承载力增加了 101.9 kN，增幅 35.4%；桩的弹性模量从 25 ~ 40 GPa，桩的极限抗拔承载力增加了 2.5 kN，增幅 0.7%；由此可见，桩长的作用效果显著，主要原因是增加了桩土界面的面积。其中，增加桩长，其达到极限状态时所对应的上拔位移也随之增加，位移增幅 154.1%，可见增加桩长不仅可以提高其极限抗拔承载力，还可以改善其达到失效状态下的变形；同样，小直径的桩在承受相同上拔荷载时，桩侧摩阻力发挥的更充分，但是其上拔量也较大，*Q-S* 曲线更陡，极易达到极限平衡状态，因此要选择最优桩径。

对不同桩长对应的抗拔极限承载力进行归一化处理，横坐标为 4、6、8、10 m 与 4 m 的比值，纵坐标为 4、6、8、10 m 分别对应的抗拔极限承载力与 4 m 的抗拔极限承载力的比值。桩径和桩身弹模也进行归一化分析，如图 17 所示。

由图 17 可知，桩身参数不同对微型桩抗拔承载性能的影响也不同。增大桩长对其抗拔极限承载力的提高较大，桩径次之，桩身弹模较小。主要是因为在承受上拔荷载时，桩为纯摩擦桩，其抵抗变形的能力主要依靠桩侧摩阻力，桩土接触面积越大，土体剪胀角越大，桩侧摩阻力发挥的更充分，增加桩长较其他两个参数来说可能更有利于桩侧摩阻力的发挥。

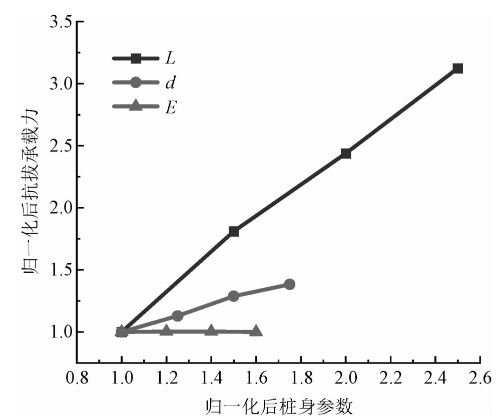


图 17　归一化后桩身参数与抗拔承载力的关系

Fig. 17　The relationship between the normalized pile parameters and the pull-out bearing capacity

4　桩身参数对抗压承载力的影响

图 18(a) ~ (c) 为桩长、桩径以及桩身弹性模量对微型桩抗压极限承载力的影响。由图 18(a) ~ (c) 可知，当下压荷载较小时，桩土位移相等，处于弹性变形阶段，荷载逐渐增加，进入塑性，沿桩周的抗剪阻力充分发挥，出现滑动现象，并且在桩承受下压荷载过程中，桩侧摩阻力自上而下发挥[16]。

随着桩身参数数值增加，桩的极限抗压承载力有不同程度的提高。桩长从 4 ~ 10 m，桩的极限抗压承载力增加了 310.2 kN，增幅 114.3%；桩径从200 ~ 350 mm，桩的极限抗压承载力增加了 192.4 kN，增幅 63.8%；桩的弹性模量从 25 ~ 40 GPa，桩的极限抗压

承载力增加了 3.8 kN,增幅 0.9%;由此可见,桩长的作用效果较为显著。

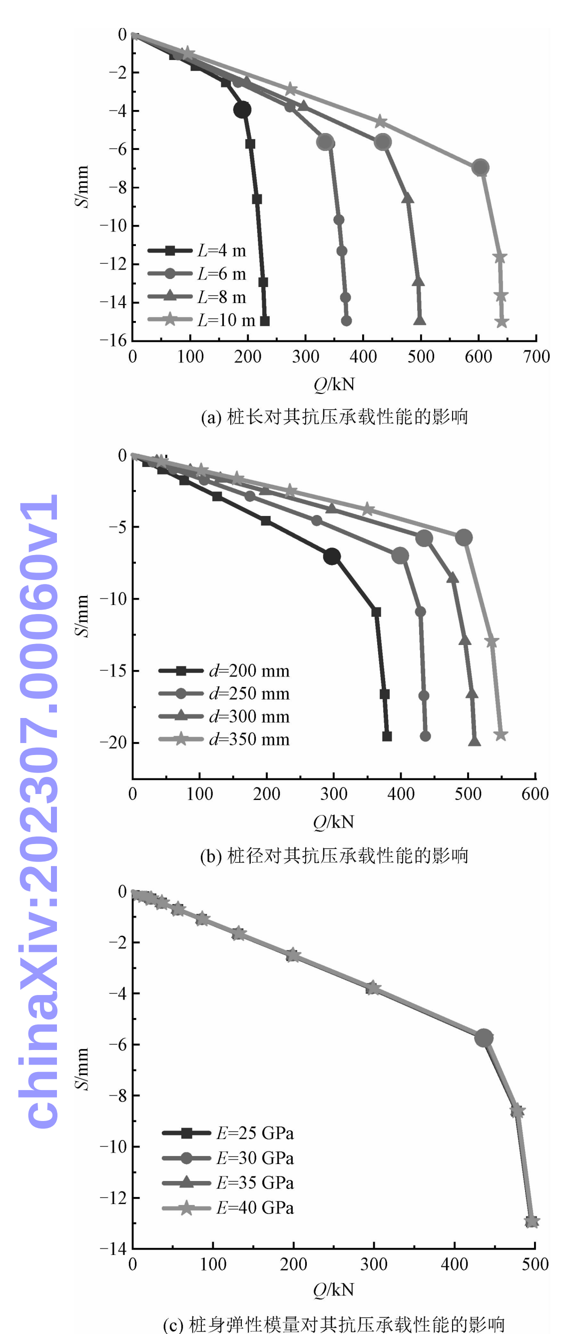


图 18 桩身参数对抗压承载性能的影响

Fig. 18 The influence of pile parameters on the compressive bearing performance

但是,增加桩长其下压的位移同样也增加了,位移增幅 50.9%,可见同样增加桩长不仅可以提高其极限抗压承载力,还可以改善其达到失效状态下的变形;但增加桩长对提高其极限抗拔承载力的能力比上拔荷载作用要低;当桩端土强度低时,小直径桩容易发生刺入变形,桩端处桩土相对位移减小且桩侧土的径向应力也减小,导致桩侧摩阻力减小,因此要选最优桩径。

同样,根据模拟结果来看,桩在受下压荷载时,桩端土体被压坏,桩没发生破坏,因此,桩的弹性模量在 25 ~40 GPa 变化对其极限抗压承载力的提高没有影响。

同样对桩长、桩径和桩身弹模做归一化分析,如图 19 所示。

由图 19 可知,不同的桩身参数会对微型桩的抗压承载力产生不同的影响。增加桩长对其抗压承载力的提高较大,桩径次之,桩身弹模较小。微型桩在受下压力时,其抵抗变形的能力除了桩侧摩阻力的发挥,还要考虑桩端土的应力分布,桩径对于桩端土的应力分布影响比桩长更大。

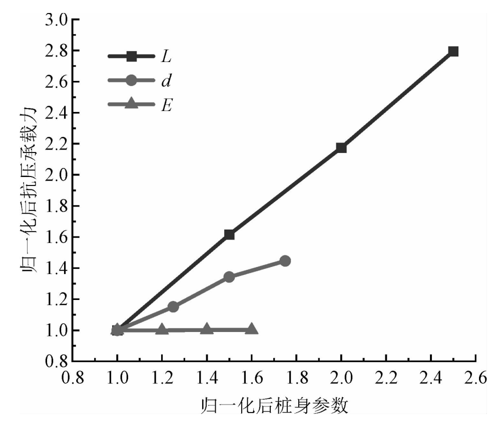


图 19 归一化后桩身参数与抗压承载力的关系

Fig. 19 The relationship between normalized pile parameters and compressive bearing capacity

5 结 论

本研究通过试验研究及数值模拟分析,研究了黄土地区输电塔微型桩基础抗拔及抗压承载力及其影响因素。基于试验及数值模拟结果得到以下结论。

1)微型桩在承受下压荷载过程中,桩侧摩阻力的发挥程度决定了极限承载力的大小,其破坏表现为沿接触面发生剪切破坏。随着桩长、桩径及桩身弹性模量数值的增加,微型桩抗压承载力提高,且达到失效状态下的变形也得到改善;其中,桩长对于其抗压承载力的提高作用最显著,桩径次之,桩身弹模在 25 ~40 GPa 范围内几乎无影响。

2)微型桩桩长对其抗拔承载力的提高作用相比于桩径、桩身弹模来说更显著,且增加桩长、桩径对

其抗拔承载力的提高作用比抗压承载力更为显著。

3)黄土湿陷性对微型桩竖向承载力影响显著，黄土浸水后其结构性遭到破坏，强度降低，破坏曲线更陡峭，且浸水后对其抗压承载力的影响相比抗拔承载力更大。

参考文献：

[1] BRUCE D A, DIMILLIO A F, JURAN I. A primer on micropiles[J]. Civil engineering, 1995, 65(12): 51-54.

[2] 吕凡任，陈云敏，梅英宝．小桩研究现状和展望[J]．工业建筑，2003, 33(4): 56-59.
LÜ Fanren, CHEN Yunmin, MEI Yingbao. Recent study and forcast of research on micropile[J]. Industrial construction, 2003, 33(4): 56-59(in Chinese).

[3] 李楠，门玉明，汪班桥，等．微型桩群桩支护均质土滑坡的振动台模型试验[J]．工程地质学报，2019, 27(6): 1371-1378.
LI Nan, MEN Yuming, WANG Banqiao, et al. Shaking model test on soil landslide supported with micropiles[J]. Journal of engineering geology, 2019, 27(6): 1371-1378(in Chinese).

[4] 胡富贵，巢万里，冯龙健．基于极限抗力的微型单桩加固边坡承载失效模式研究[J]．公路，2020, 65(4): 12-18.
HU Fugui, CHAO Wanli, FENG Longjian. Research on failure mode of slope reinforced by single micro-pile based on ultimate resistance[J]. Highway, 2020, 65(4): 12-18(in Chinese).

[5] 曹明星，高永涛，周喻．基于树根桩地基加固法的井塔纠偏方案[J]．中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(10): 2906-2916.
CAO Mingxing, GAO Yongtao, ZHOU Yu. Correction scheme of auxiliary shaft tower based on foundation reinforcement method using root piles[J]. Journal of Central South University (science and technology), 2020, 51(10): 2906-2916(in Chinese).

[6] 唐超．超长微型桩在高层建筑托换中的受力机理研究[D]．济南：山东建筑大学，2020.

[7] 程永锋．微型桩基础在输电线路工程中的应用[M]．北京：中国电力出版社，2012.

[8] SHIN E C, DAS B M, PURI V K, et al. Ultimate uplift capacity of model rigid metal piles in clay[J]. Geotechnical and geological engineering, 1993, 11(3): 203-215.

[9] 龚健．软土地基中杆塔微型桩基础的性状研究[D]．杭州：浙江大学，2004.

[10] 吕凡任，陈仁朋，陈云敏，等．软土地基上微型桩抗压和抗拔特性试验研究[J]．土木工程学报，2005, 38(3): 99-105.
LÜ Fanren, CHEN Renpeng, CHEN Yunmin, et al. Field tests on compression and uplift behavior of micropiles in soft ground[J]. China civil engineering journal, 2005, 38(3): 99-105(in Chinese).

[11] 苏荣臻，郑卫锋，鲁先龙，等．软土地区杆塔基础微型桩抗拔特性试验研究[J]．电力建设，2008, 29(12): 23-25.
SU Rongzhen, ZHENG Weifeng, LU Xianlong, et al. Experiment on uplifting characters of micropiles of tower foundations in soft soil[J]. Electric power construction, 2008, 29(12): 23-25(in Chinese).

[12] SHELKE A, PATRA N R. Effect of arching on uplift capacity of single piles[J]. Geotechnical and geological engineering, 2009, 27(3): 365-377.

[13] 屈勇．输电线路微型桩基础承载性能的数值模拟[J]．电力建设，2011, 32(2): 59-61.
QU Yong. Numerical analysis ofmicropile foundation for transmission line[J]. Electric power construction, 2011, 32(2): 59-61(in Chinese).

[14] 张奎，韩晓雷．黄土地层微型桩水平承载力研究[J]．西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(5): 694-700.
ZHANG Kui, HAN Xiaolei. Research on micropile horizontal bearing capacity in the loess stratum[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (natural science edition), 2015, 47(5): 694-700(in Chinese).

[15] GIBBS H J, HOLLAND W Y. Petrographic and engineering properties of loess[M]. Denver: Technical Information Branch, Denver Federal Center, 1960.

[16] 张乾青，张忠苗，张广兴．桩基工程[M]．2 版．北京：中国建筑工业出版社，2018.

[17] 夏旺民，郭新明，郭增玉，等．黄土弹塑性损伤本构模型[J]．岩石力学与工程学报，2009, 28(增 1): 3239-3243.
XIA Wangmin, GUO Xinming, GUO Zengyu, et al. Elastoplastic damage constitutive model of loess[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2009, 28(z1): 3239-3243(in Chinese).

[18] 朱以文，蔡元奇，徐晗．ABAQUS 与岩土工程分析[M]．北京：中国图书出版社，2005.

[19] 武玉萍，付红安，王佳佳，等．黄土地基微型桩水平承载力及群桩效应研究[J]．应用力学学报，2022, 39(3): 543-553.
WU Yuping, FU Hongan, WANG Jiajia, et al. Horizontal bearing capacity and pile group effect of micro-pile on loess ground[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(3): 543-553(in Chinese).

（编辑　史淑英）